

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ГРУНТОВЫМ МАССИВОМ

Н.В. Савицкий, д.т.н., проф., Гуслистая А.Э., аспирант

Постановка проблемы.

Проблема рационального использования оползнеопасных территорий является одной из самых актуальных экономических проблем современного строительства. Это связано с тем, что сооружение противооползневых конструкций требует привлечения значительных финансовых ресурсов.

Поэтому в качестве альтернативы существующим методам инженерной защиты предлагается использование многофункциональных противооползневых сооружений [1, 2, 3]. Такие сооружения совмещают две функции: функцию противооползневой защиты и функцию ограждающих конструкций зданий и сооружений различного назначения.

Следует отметить, что данные сооружения относятся к числу заглубленных, поэтому для обеспечения их надежности и экономичности при проектировании необходимо точно определять контактные напряжения, возникающие на поверхности контакта сооружения и грунтового массива.

Как известно, характер распределения контактных напряжений зависит от жесткости, формы и размеров сооружения и от жесткости (податливости) грунта. При этом различают три случая, отражающие способность сооружения и грунтового массива к совместной деформации [4]:

- 1) *абсолютно жесткие* сооружения, когда деформируемость сооружения ничтожно мала по сравнению с деформируемостью грунта и при определении контактных напряжений сооружение можно рассматривать как недеформируемое;
- 2) *абсолютно гибкие* сооружения, когда деформируемость сооружения настолько велика, что оно свободно следует за деформациями грунта;
- 3) сооружения *конечной жесткости*, когда деформируемость сооружения соизмерима с деформируемостью грунта; в этом случае они деформируются совместно, что вызывает перераспределение контактных напряжений.

Большинство сооружений по условиям работы конструкций имеют конечную жесткость.

В связи с тем, что давление грунта на сооружения конечной жесткости является функцией их прогибов, построение эпюр давления представляет собой весьма сложную задачу даже в простейшем случае однородного грунта. Анализ публикаций по данному вопросу показал, что имеющиеся строгие решения оказались непригодными для применения их в практических задачах, и поэтому построение эпюр давления грунта до сих пор производится по методам, не учитывающим в полной мере специфики взаимодействия грунта и сооружения [5, 6, 7].

Сегодня, в связи с появлением и развитием численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ), можно, используя готовые программные комплексы, достаточно точно смоделировать сложный процесс взаимодействия грунта и сооружения, а также определить напряженно-деформированное состояние грунтового массива. При этом достоверность результатов, полученных при численном моделировании, зависит от того, насколько адекватной будет созданная расчетная модель реальным условиям.

Целью настоящего исследования является разработка методики численного моделирования работы заглубленного сооружения, которая учитывает основные особенности данной задачи и таким образом обеспечивает адекватность расчетной модели.

Изложение основного материала

Методика моделирования включает в себя три основных пункта: выбор программного комплекса, собственно моделирование и контроль результатов.

1. Выбор программного комплекса

Расчет заглубленного сооружения, взаимодействующего с грунтовым массивом, как уже указывалось выше, представляет собой контактную задачу и может быть выполнен в любом имеющемся в распоряжении расчетчика программном пакете. Однако при этом данный пакет должен отвечать следующим минимальным требованиям:

- обеспечивать возможность решения статической задачи с учетом физической и геометрической нелинейности;
- иметь в составе библиотеки конечный элемент, моделирующий поведение грунтового массива согласно известным моделям прочности грунта (например, модели Кулона – Мора);
- обеспечивать возможность задания контактных условий на границе «заглубленное сооружение – грунт». Для этого необходимо наличие в библиотеке программного пакета специальных контактных элементов, моделирующих конструктивную нелинейность задачи. При этом под конструктивной нелинейностью понимается изменение расчетной схемы по мере деформирования конструкции.

Авторами в процессе исследования работы заглубленных сооружений применялся ПК "Лира" (версия 9.0) [8].

2. Моделирование

Заглубленное сооружение, взаимодействующее с грунтовым массивом, представляет собой сложную геотехническую систему. В связи с этим процесс моделирования предлагается проводить в три этапа:

этап 1: Создание расчетной модели заглубленного сооружения;

этап 2: Создание расчетной модели грунтового массива;

этап 3: Моделирование поверхности контакта "заглубленное сооружение – грунт".

Для определения основных принципов и выявления особенностей моделирования рассматривалась задача взаимодействия подпорной стены с грунтовым массивом (рис. 1). Численная модель данной задачи представлена на рис. 2 (рассматривался случай плоской деформации). При этом варьировались

как геометрические размеры конструкций, так и их жесткостные характеристики.

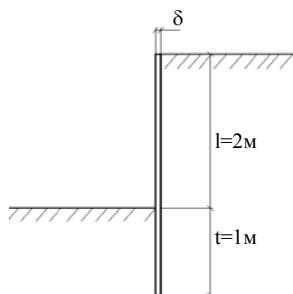


Рис. 1. Расчетная схема подпорной стены

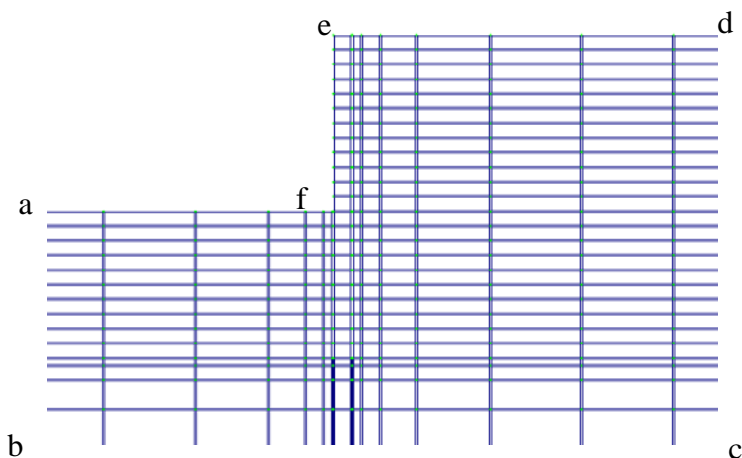


Рис. 2. Численная модель подпорной стены, взаимодействующей с грунтовым массивом

Этап 1. Создание расчетной модели заглубленного сооружения

1) В процессе исследования работы геотехнической системы, как уже отмечалось, рассматривались подпорные стены, имеющие различную жесткость. В качестве критерия оценки жесткости рекомендуется использовать безразмерный показатель гибкости по М.И. Горбунову-Посадову [9]:

$$t \approx 10 \frac{El^3}{E_{\kappa} \delta^3},$$

где E и E_k - модуль деформации грунта и материала конструкции; l и δ - длина и толщина конструкции. Показатель гибкости изменялся в диапазоне $80 < t < 3200000$.

2) Для моделирования конструкции стены использовались физически нелинейные универсальные прямоугольные конечные элементы балки-стенки (КЭ 241) (в случае железобетонной подпорной стены). Шаг разбивки на конечные элементы по вертикали принимался равным $1/10 \dots 1/20$ высоты стены.

Этап 2. Создание расчетной модели грунтового массива

1) На данном этапе моделирования особое внимание следует уделить тому факту, что грунты обладают особыми свойствами, существенно отличающимися от свойств конструкционных материалов. Это вызывает необходимость применять в процессе моделирования грунтового массива специальные грунтовые физически нелинейные конечные элементы плоской задачи (КЭ 281, 282, 284). Данные КЭ моделируют одностороннюю работу грунта на сжатие с учетом сдвига по схеме плоской деформации. Учет специфики грунтов производится на основании модели прочности грунта Кулона-Мора. В этом случае условие предельного равновесия грунта записывается в виде:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \leq \sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_2) + 2c \cdot \cos \varphi,$$

где $\sigma_1 \geq \sigma_2$ - главные напряжения,

c - удельное сцепление грунта,

φ - угол внутреннего трения.

Расчет производится шагово-итерационным методом.

2) Шаг разбивки грунтового массива на КЭ принимался равным приблизительно $1/10 \dots 1/20$ размеров массива (как по горизонтали, так и по вертикали). В зонах, непосредственно примыкающих к стенке, сетка КЭ сгущалась с целью получения наиболее точных значений напряжений в зоне контакта стенки и грунта.

3) Граничные условия принимались следующие [10]:

перемещения на границе bc равны нулю; по границам ab и cd допускаются только вертикальные перемещения; перемещения на свободных поверхностях af и ed не ограничиваются.

Этап 3. Моделирование поверхности контакта

"заглубленное сооружение – грунт"

Важной задачей на данном этапе моделирования являлось обеспечение на поверхности контакта условия проскальзывания стенки относительно грунта в вертикальном направлении.

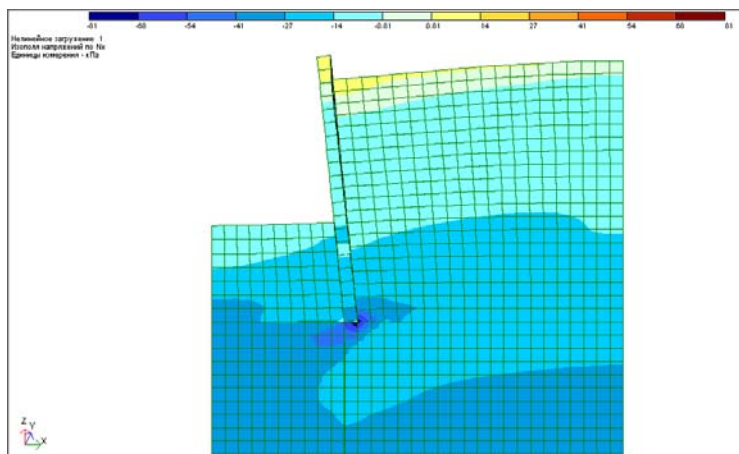
Для этого использовались специальные конечные элементы односторонних связей (КЭ 262), работающие только на сжатие. Решение задачи при этом производится итерационным методом. Если на какой-либо из итераций усилие в связи стало больше нуля, то связь на последующей итерации выключается из работы.

3. Контроль результатов.

Контроль результатов начинался с анализа деформированной схемы сооружения. После проверки адекватности деформированной схемы сравнива-

лись значения контактных напряжений, полученные с помощью численного моделирования и полученные аналитическим путем.

Типичная картина напряженно-деформированного состояния системы представлена на рис. 3.



*Рис. 3. Типичная картина деформирования системы
"подпорная стена – грунтовый массив"*

Выводы

1. Предложена методика оценки напряженно-деформированного состояния системы «заглубленное сооружение – грунтовый массив». Выявлены особенности и даны предложения по моделированию работы системы.

2. Решены тестовые задачи, доказывающие возможность применения ПК "Лира" для решения задач взаимодействия заглубленных сооружений с грунтовым массивом.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Инновационная стратегия разработки энергоэффективных противооползневых сооружений в г. Днепропетровске / И.И. Куличенко, Н.В. Савицкий, В.И. Большаков, В.П. Козинец // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Вып. №15. – Днепропетровск: ПГАСиА, Gaudeamus, 2001. – С. 5 – 13.
2. Разработка технических предложений по комплексу противооползневых сооружений, размещаемому на однопрофильных склонах (КПОС-1) / Куличенко И.И., Савицкий Н.В., Большаков В.И., Козинец В.П., Никифоров Ю.Н. // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Вып. №16. – Днепропетровск: ПГАСиА, Gaudeamus, 2002. – С. 5 – 8.

3. Предложения по комплексу противооползневых сооружений, размещаемому на двухпрофильных склонах (КПОС-2) / Куличенко И.И., Савицкий Н.В., Большаков В.И., Козинец В.П., Сысоев С.Ю., Никифоров Ю.Н. // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Вып. №19. – Днепропетровск: ПГАСиА, Gaudeamus, 2002. – С. 17 – 21.
4. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учеб. пособие для студ. вузов / Под ред. С.Б.Ухова. – М.: Изд-во АСВ, 1994. – 527 с.: ил.
5. Будин А.Я. Тонкие подпорные стенки. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1974. – 191 с. с черт.
6. Руководство по проектированию подпорных стен и стен подвалов для промышленного и гражданского строительства / ЦНИИПромзданий Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1984. – 117 с.
7. СНиП 2.01.15-90. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования / Госстрой СССР. – М.: Арендное производственное предприятие ЦИТП, 1991. – 32 с.
8. ПК ЛИРА, версия 9. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно-теоретическое пособие / Под ред. А.С. Городецкого. – К. – М.: "Факт", 2003. – 464 с.: ил.
9. Расчет конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.: ил.
10. Ухов С.Б. Расчет сооружений и оснований методом конечных элементов. Учеб. пособие. – М., 1973. – 118 с. с черт.

В статье изложена методика численного моделирования работы заглубленных сооружений с учетом взаимодействия с грунтовым массивом. Методика предполагает использование ПК ЛИРА (версия 9.0) и позволяет исследовать работу заглубленных сооружений различной жесткости.